干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000－6060.2019.04.11

基于 EOF 和 REOF 的 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝空间分布特征分析①

赵　峰，　毕硕本，　李兴宇，　武玮婷，　蒋婷婷
（南京信息工程大学地理科学学院，江苏　南京　210044）

摘　要：基于通过历史文献资料重建的 1470—1911 年黄河中下游地区 36 个站点的历史旱涝等级序列和矢量化的历史地图，利用 EOF、REOF 方法分析旱涝灾害空间特征。EOF 方法展开的结果表明：前 4 个模态累计方差贡献率为 71.85%，主要表现为第一、二、四特征向量场呈经向带状分布，第三特征向量场呈纬向分布；第一特征向量场的空间分布均为正值，说明黄河中下游地区的旱涝变化具有一致性，但是其余各特征向量场之间特点差异明显，说明在不同背景场和影响条件下，旱涝变化还存在较多局域性特征；REOF 展开的结果可将黄河中下游地区旱涝划分为 5 个典型的敏感气候分区，这为进一步研究该区旱涝变化的区域性特征奠定了基础。

关 键 词： EOF；REOF；旱涝；空间特征；黄河中下游地区
文章编号： 1000－6060（2019）04－0799－11（0799～0809）

近年来，有关于气候变化的研究越来越受到重视，掌握过去气候的变化规律，以此预测未来气候变化趋势，是当前气候变化研究的一项主要工作。气候变化研究已渗透到非常广泛的各个科学领域，众多学者开始从事该领域的研究[1]。我国季风气候特点显著且类型多样，资源丰富的季风不仅带来了适宜多种多样动植物的生存环境，但干旱、洪涝等气象气候灾害约占到了所有我国自然灾害的 70%。本文从数理统计方法、气候学中的时空特征分析方法到数据的归纳统计转变为深入挖掘，将隐藏在数据库中有用的海量信息和知识提取出来。数据挖掘应用于气候灾害、气候变化的研究对于提高未来气候预测的准确性和做好防灾减灾的预备工作有着极其深远的意义[2]。通过整理我国黄河中下游地区的河南、山西、陕西、山东四个省份 1470—1911 年间的旱涝灾害记录，了解其空间分布和变化情况，从中得出黄河中下游地区旱涝灾害的形成发展规律，与现代旱涝变化形成对应。

国内外有关于旱涝灾害方面已有大量研究。KNOX [3]通过对历史洪水事件研究变化分析，如 1～2 ℃的气温变化和小于 10%～20% 的降水变化就能阐释较大洪水事件发生的可能性。JOSE [4]等搜集与整理了洪水事件，为欧洲近 60 a 来洪水事件的研究提供了大量事实依据。张德二[5]开展了在整理历史文献基础上利用数理统计方法重建历史气候序列、逐年绘制历史旱涝分布图、编制古环境事件年表，得到大量较高时空分辨率的古气候变化信息。郑景云等[6]通过对 1949 年之前 2 000 a 有关旱涝灾害的记录、地方志、各类史书以及民国相关报纸等资料进行整理、分类，指出公元 101 年—1900 年间中国东部每 200 a 的干湿分异及演变，并讨论干湿分异同冷暖变化的对应关系。郑景云等[7]根据汉代以来旱涝灾害记载重建旱涝等级，和已重建的东部地区干湿指数序列，定义判别历史时期极端旱涝事件的标准，对华北、江淮和江南分区域辨识在过去 2000 a 中的重大旱涝事件。识别各个区域重大干旱、洪涝的多发时段。同时利用 27 万条自然灾害史料的记载，整理我国东部、南部共 85 个地区受灾县次记录并分析这些记录的可靠性，建立了这些地区 1471—1950 年旱涝指数序列，选北京为代表地区详细说明旱涝指数序列建立的过程，并分析方法可靠性。周后福[8]基于安徽省近554a的旱涝等级资料，

① **收稿日期：** 2018－12－30；　**修订日期：** 2019－04－08
基金项目： 国家自然科学基金项目（41271410，41071253）
作者简介： 赵峰（1993－），男，浙江湖州人，硕士研究生，主要研究方向为地理数据挖掘. E-mail：zhaofeng1993@163.com
通讯作者： 毕硕本. E-mail：bishuoben@163.com

利用偏度系数、峰度系数、频次、累积距平等计算公式和方法进行分析,发现安徽省旱涝等级序列具有偏态分布性,涝灾明显多于旱灾。贾铁飞等[9]基于历史文献水旱灾害记录,重建了巢湖流域1370—1988年旱涝灾害等级序列,并进行连续功率谱分析,指出巢湖流域涝灾和旱灾发生的频率几乎相当。张强等[10]对海安地区1951年以来汛期总量与夏季最高温作了突变检测分析以对该区近年来洪旱灾害的发生规律做探讨。殷淑燕等[11],仇立慧等[12]和孟婵等[13]整理并分析了清代及清末以来汉江上游洪涝灾害及暴雨洪水灾害发生的频次,指出洪涝灾害呈现增加的趋势。

前人就历史时期黄河中下游地区旱涝灾害的研究已开展一定工作[14-16],这为了解长期以来黄河中下游地区旱涝灾害在较长时间尺度上的周期变化规律、时频特征、空间分布等提供了现实依据。黄嘉佑等[17]、何素兰等[18]在早期工作中重点关注了黄河中下游地区旱涝发生的低频振荡特征,发现该区旱涝的发生周期与乌拉尔山区、贝加尔湖地区有很好的对应,黄河中下游地区旱年夏季,上述地区低频振荡周期短、谱值高,而在涝年恰好相反。郑景云等[19]主要通过搜集历史文献资料关于旱涝灾害的记载,重建了几百年尺度上黄河全流域或中、下游地区的历史降水时间序列,在此基础上指出了旱涝灾害发生的多时间尺度特征、突变规律等特征,极大地丰富了基于器测资料所开展的工作。进入到21世纪以来,郝志新等[20]深入探讨了黄河中下游地区的旱涝灾害发生的周期性规律,此外,除了针对黄河中下游地区的展开研究之外,还得出了相关子区域的逐年降水序列,发现黄河中下游地区的降水具有2~4 a、准22 a及70~80 a等年纪与年代际周期。李周等[21]利用黄河中下游地区44个站点1978—2005年夏季降水资料,通过EOF、REOF方法探究了降水时空分布与演变特征,得出降水分布的多种空间分布型。王文等[22]研究指出,黄河中下游地区旱涝在降水日数上具有多种明显的低频振荡特征,分析与青藏高原热源变化低频振荡间的关系,二者有显著关系,指出前者的发生受后者变化的间接影响。

综上所述,关于黄河中下游地区旱涝灾害的研究已经取得较为丰硕的成果,但重建历史旱涝、降水时间序列[23]的基础上,关于空间分布特征的研究多基于现代器测降水资料,对历史时期旱涝变化进行空间分布型探究和气候敏感区域划分的报道较少。我们通过重建黄河中下游地区442 a旱涝等级,探究在不同空间模态不同分布型,划分敏感气候分区,为进一步精细化探讨该地区不同子区域的灾害分异规律奠定基础。

1 数据来源与研究方法

1.1 研究区概况

黄河中下游地区位于我国东部地区,介于华北平原以南和江淮地区以北,西北东部地区的黄土高原,黄河中下游地区主要有陕西、山西、河南和山东四个省份。地形以高原、平原及山地为主,地面植被自西向东为温带草原地带和温带落叶阔叶林带。四季气候变化受明显季风影响,在气候类型上属于较为典型的半干旱半湿润地区。

1.2 数据来源

历史旱涝灾害记录主要来源于《中国三千年气象记录总集》[24],同时结合《黄河流域近2000年来旱涝灾害水文气候数据集》[25],对缺失年份和站点的数据加以补充完善。并重建了1470—1911年间共442 a的黄河中下游地区历史旱涝等级,具体方法参照的是《中国近500年旱涝分布图集》[26]。历史时期行政区划空间来自《中国历史地图集》[27]矢量化的结果(图1),范围主要包括河南、陕西、山西、山东四省。图1是黄河中下游地区历史旱涝等级的36个站点且均匀分布,涵盖整个研究区范围,能客观反映黄河中下游地区1470—1911年间旱涝灾害的变化情况。

1.3 历史旱涝等级的确定

记录全面、描述精准的历史文献资料是重建历史旱涝等级、研究旱涝时空分异规律的关键基础。根据《中国三千年气象记录总集》中的“大旱”、“连日不雨”等词语组成了旱涝灾情“典型词典”,各个等级划分的标准如表1所示。

在根据表1确定单站点旱涝等级基础上,计算区域旱涝指数k,k依据如下公式[28]计算得出,表2是根据区域旱涝指数k划分区域旱涝等级的标准。

$$k = \left(\sum F + \sum D + \sum E\right) \Big/ \left(N \times E\right) \quad (1)$$

式中:k为黄河中下游地区区域旱涝指数,F表示单站点洪涝灾害等级值,D表示单站点干旱灾害等级值,E表示单站点正常年份旱涝等级值,N为区域内站点个数。

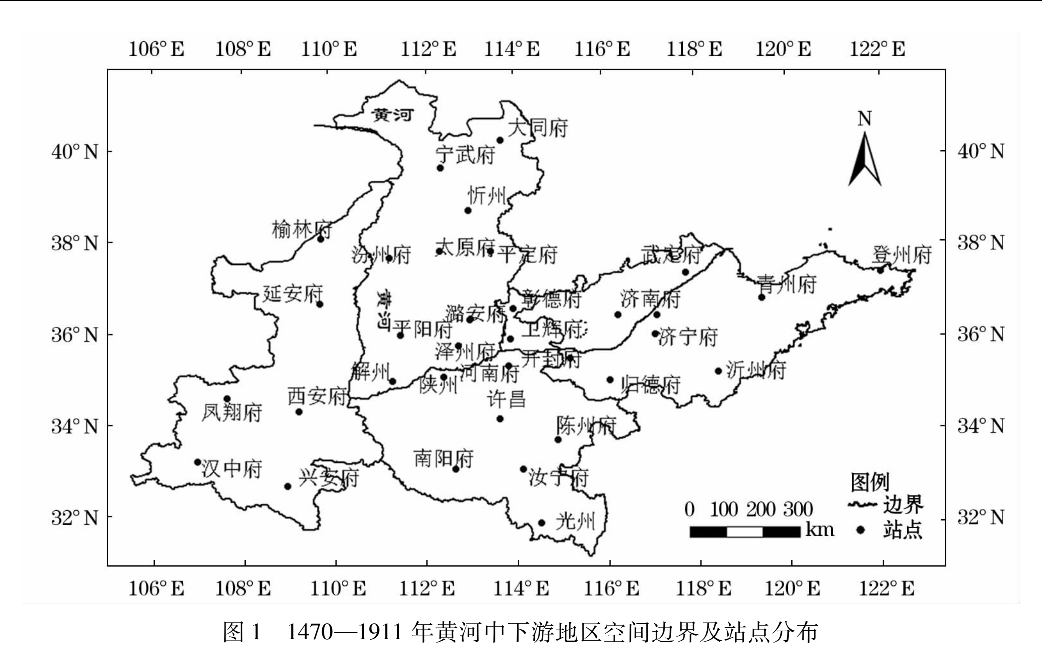


图 1　1470—1911 年黄河中下游地区空间边界及站点分布

Fig. 1　Space boundary and station distribution in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911

表 1　旱涝灾害等级的定级标准

Tab. 1　Flood and drought grade standard of grading

等级	标准	主要反映	
		自然方面	社会方面
涝	持续时间长或强度大、范围广的水灾	大雨如注,居民房屋漂没,陆地行舟,江河泛滥,农田淹没等	斗米千钱,民多流徙,人相食,免出赋,饿殍载道等
偏涝	单季不严重持续性水、单月局地大水	水灾,涝,水深尺许,房屋、农田未受到严重破坏,牲畜、人未有较大数目伤亡等	米斗百钱,民多逃亡,饥,民吃树皮,免本年田赋等
正常	无	大有年等 丰稔	无
偏旱	单季或单月、局部地区的旱	少雨或者不雨,庄稼受到轻微影响,河流水竭,禾麦歉收,蝗起等	米斗百钱,赈灾少,民多逃亡,饥,免本年田赋等
旱	持续数月或跨季度、大范围严重的旱	连续几个季度、数年不雨,河水枯竭,赤地千里,庄稼歉收等	斗米千钱,免田赋,民多流徙,人相食,蝗,饿殍遍野等

表 2　区域旱涝指数分级标准

Tab. 2　Regional drought index classification standard

旱涝等级	1(涝)	2(偏涝)	3(正常)	4(偏旱)	5(旱)
k	0.33 ~ 0.67	0.68 ~ 0.90	0.91 ~ 1.10	1.11 ~ 1.32	1.33 ~ 1.67

通过上面介绍的定级原则,得到各站点自 1470—1911 年的旱涝等级值。

1.4　研究方法

主成分分析方法应用到气象领域中后被称之为经验正交函数(Empirical Orthogonal Function, EOF)方法[29]。与某些分解时需要以某种特殊基函数的方法相比,没有固定的基函数。能对各种分布不规则的气象要素场进行时空场分解,分解后得到的各个特征向量相互正交,不同空间模态可以很好反映气象要素时空场的空间分布特点;同时,EOF 分解的展开、收敛速度均很快,变量场的信息能够很容易的集中在前几个模态上;累计方差贡献率达到一定程度的前几个模态具有一定物理意义,可有效反映气象要素时空场的变化特征。

EOF 分解方法首先将某气候变量时空场的观测资料以矩阵的形式给出:

$$X = \begin{matrix} x_{11} & x_{12}\cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22}\cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2}\cdots & x_{mm} \end{matrix} \tag{2}$$

式中：m 代表空间点（观测站点或网格点）的个数，n 表示时间序列的长度即观测次数。并将矩阵分解为空间函数 V 与时间函数 T 二者的乘积之和：

$$x_{ij} = \sum_{k=1}^{m} v_{ik} t_{kj} \qquad (3)$$

式中：x_{ij}表示第 i 个空间点上的第 j 次观测值，可以看作是 m 个空间函数 v_{ik}和时间函数 t_{kj}的线性组合。

也可写成矩阵形式为：

$$X = VT \qquad (4)$$

式中：

$$V = \begin{matrix} v_{11} & v_{12}\cdots & v_{1n} \\ v_{21} & v_{22}\cdots & v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ v_{m1} & v_{m2}\cdots & v_{mm} \end{matrix}$$

$$T = \begin{matrix} t_{11} & t_{12}\cdots & t_{1n} \\ t_{21} & t_{22}\cdots & t_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ t_{m1} & t_{m2}\cdots & t_{mm} \end{matrix} \qquad (5)$$

二者分别被称为空间函数矩阵和时间系数矩阵，为正交关系。由此可得到 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝时空场的空间模特和时间系数，能有效反映旱涝灾害随时间变化的空间分布情况。目前，EOF 方法已经广泛应用在大气科学领域的各项研究工作中[30-32]。

旋转经验正交函数分解（Rotated Empirical Orthogonal Function，REOF）方法是在对时空向量场进行过 EOF 分解的基础上，对原矩阵进行极大方差旋转（正交旋转），使同一空间模态下高载荷向量场均集中在部分区域的少数变量中，其余地区则均接近于 0，经旋转之后的特征场在时间上更为稳定，空间分布结构更为清晰，重要的是更能突出气候要素在空间上异常分布的局域特征[33]。

对于一标准化的含有 m 个变量，n 次观测样本的资料库 $X_{m\times n}$可以表示为公共因子矩阵 $T^*_{p\times n}$（$p < m$）和因子荷载阵 $V_{p\times p}$的乘积及特殊因子 $U_{m\times n}$之和的形式[34]：

$$X = VT^* + U \qquad (6)$$

特殊因子仅与 X 有关，与 EOF 的差别仅在于此。

公共因子是标准化变量各公共因子均是均值为 0、方差为 1 的独立变量。

$$T^* = \Lambda^{-\frac{1}{2}} V'X \qquad (7)$$

式中：V' 表示为 V 的转置矩阵，Λ 为 XX'矩阵的特征值构成的对角阵。

从而，

$$X = V\Lambda^{\frac{1}{2}}\Lambda^{-\frac{1}{2}}T \qquad (8)$$

如果把 p 个公共因子看成由 p 个因子空间构成的坐标基，因子荷载就视为 p 个变量在这个坐标基上的投影。

因此，REOF 方法也是一种很好的区域气候类型划分方法，不但可以明显地反映出气候要素在不同区域的变化情况，而且能很好地体现各个区域空间分布的相关性，与此同时，还能保证较小的取样误差。近年来，REOF 方法在大气科学领域的研究中使用频率日渐频繁，经过分离原来的特征向量之后，使得空间结构更为清晰，明显地体现出了气候特征在不同空间模态上的分布特征[35]。近 20 a 作用的时间里，国内外大气科学界的学者们已经将 REOF 方法成功应用在气候分区的研究中，并取得丰硕成果[36-38]。

2 结果与分析

EOF 分解与 REOF 方法在提取气候要素场显著信号与反映气候要素空间分布特征与时间变化特征等方面有着独到的优越之处[39]。作者在研究中采用了 EOF 和 REOF 两种不同的经验正交函数分解方法，探究 442 a 中黄河中下游地区旱涝灾害的时空演变特征，重点是通过两种方法找出旱涝灾害在空间上的分布规律，并由 REOF 方法划分黄河中下游地区旱涝灾害气候分区，为研究黄河中下游地区旱涝灾害分布的区域性特征提供现实依据。

2.1 EOF 分析

采用 EOF 方法对黄河中下游地区 442 a 间 36 个站点旱涝等级值标准化距平场进行分解，将原始场分离得到的是空间载荷向量及其对应的时间系数。由于研究区范围较大、时间序列长度较长等因素，各地灾害等级空间分布在表现除显著差异性外，同时还伴随变率较大的问题，因此，导致载荷向量的收敛速度较慢，但尚未影响到表征黄河中下游地区各个区域旱涝灾害特征信息，表 3 给出的分别是 1470—1911 年黄河中下游地区各站点的旱涝等级序列的 EOF 和 REOF 分解的前 10 个模态方差贡献

表 3 1470—1911 年黄河中下游地区各站点的旱涝等级序列的 EOF 和 REOF 分解的前 10 个模态方差贡献率与对应的累计贡献率

Tab. 3 Contribution and corresponding cumulative contribution rate of the top 10 models of drought/flood level sequence EOF and REOF decomposition in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911

模态	EOF		REOF	
	方差贡献率 / %	累计方差贡献率 / %	方差贡献率 / %	累计方差贡献率 / %
1	38.09	38.10	39.63	39.63
2	15.14	53.23	14.19	53.82
3	8.74	61.98	9.12	62.94
4	5.24	67.21	5.62	68.56
5	4.64	71.85	4.65	73.21
6	3.37	75.22	3.02	76.23
7	2.91	78.29	3.13	79.36
8	2.12	80.25	2.06	81.42
9	1.84	82.09	1.91	83.33
10	1.60	83.69	1.62	84.95

率与对应的累计贡献率。给出了 EOF 分解得到的前 10 个载荷向量的方差贡献率,累计方差贡献率达到 83.69%。

对于分解得到的经验正交函数进行 North[40] 检验,以便确定其中蕴含的信息是不具实际意义的噪声还是可以表征灾害变化特征、具有实际物理意义的有效信号。EOF 分解前 4 个模态通过了检验,累计方差贡献率为 71.85%,图 2 是 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝等级 EOF 分解的前 4 个模态及其时间系数。

图 2a 是第一特征向量的空间分布,其方差贡献率为 38.09%,该模态最具优势地位,是表征旱涝灾害变化的主要分布形式。全区特征向量均呈正值分布,说明旱涝灾害空间分布在该模态下具有整体一致性。从地理位置上而言,研究区均处于我国东部季风区,降水变化明显受季风控制,自东向西的地势起伏变化较为平坦,除太行山区外的其他地区在地形上对降水分布的影响不大,因此整个气候系统在全区总体水平上对降水多少变化影响是一致的,即在某时段降水量在区域内普遍偏少或偏多,使得全区一致发生干旱或洪涝灾害。荷载大值区分别位于区域北部以山西省东部的平定府、太原府为中心,区域西部以陕西省西南部的汉中府、兴安府为中心,区域南部以河南省南部的光州为中心,最大处逾0.50,是黄河中下游地区特征值变率最大、对旱涝变化反应最敏感的三个地区。区域中部和东部地区虽荷载值亦表现出较大趋势,但等值线稀疏,灾害变率不如上述三个大值区明显。整体上呈现出:旱涝灾害变率由内陆地区向沿海地区增大的趋势,山西省东部、陕西省西南部和河南省南部是旱涝交替变化较明显的地区,干旱和洪涝的发生表现为一致偏多或一致偏少。

图 2b 是第二特征向量的空间分布,方差贡献率为 15.14%,负相位荷载最大的地区主要有区域北部分别以山西省中东部的太原府、平定府和南部的平阳府为中心,以区域西南部位于陕西省的西安府为中心,载荷高值中心达到 -0.42。正相位载荷最大的地区主要是分别以山东省的泰安府、济宁州为中心,鲁豫交界处的曹州府为中心,载荷高值最大为 0.48。全区呈现"东正西负"型的反向分布,"零"线自北向南大致位于彰德府—卫辉府—南阳府一线。说明黄河中下游地区的旱涝变化在这一模态下表现出相同时段内以零线为界的东、西部之间灾害类型相反的特征,当零线东部发生干旱灾害时西部发生洪涝灾害,而当零线东部发生洪涝灾害时西部地区发生干旱灾害。这种经向上的差异与区域内不同地区周边地理位置与环境有一定关系,联想到研究区显著的季风气候:在季风强度一般或偏弱年份,加之太行山脉的阻挡,水汽很难到达区域西部带来降水,而此时东部却因渤海地区三面环海且地势平坦利于水汽推进、季风强度一般使得雨带在此停留而降水充足;相反地,西部地区是在季风强年水汽冲破山脉和较高地势的阻挡带去充沛降水,而此时的雨带偏西、偏北,致使区域东部相对较为干旱。

图 2c 是第三特征向量的空间分布,方差贡献率为 8.74%,该模态下全区的旱涝灾害空间分布呈现"南正北负"反向分布型,特征值空间分布的"零"线自西向东处于 35.5°N 左右的解州—潞安府一线,自北向南大致位于鲁、豫交界。当零线南部地区发生干旱灾害时北部发生洪涝灾害,而当南部地区发生洪涝灾害时北部发生干旱灾害。考虑该模态下地理要素的影响,地势与地形差异均不是主要因素,主要与区域周边环境和水域分布有关,特征向量存在一致变化的是环渤海地区的山东半岛与山西局部,而除此之外的内陆地区特征向量符号恰好相反。该模态下负相位荷载较大的地区主要以区域东部的济南府、泰安府为中心,区域北部以宁武府、太原府、平

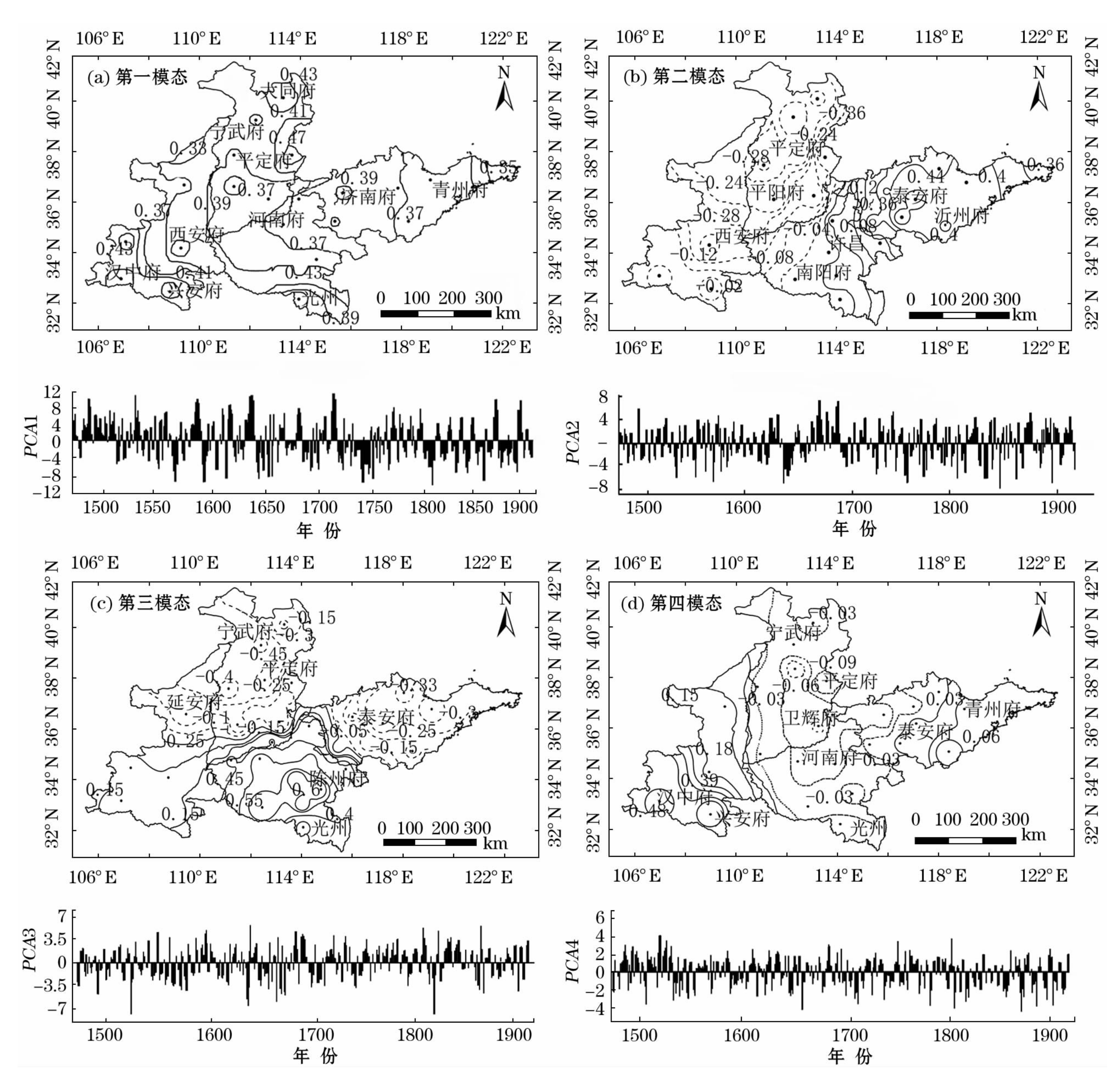


图 2 1470—1911 年黄河中下游地区旱涝等级 EOF 分解的前 4 个模态及其对应的时间系数

Fig. 2 First four model (a. The first model, b. The second model, c. The third model, d. The fourth model) of EOF decomposition and its time factor in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911

定府为中心和以汾州、延安府为中心的分布，载荷高值中心达到 -0.52。正相位载荷最大的地区主要以区域南部的河南光州为中心，陈州、许昌为中心，河南府为中心以及山东省西部的曹州府为中心的分布，西部地区等值线系数，特征值较小，变率不大。

图 2d 是第四特征向量的空间分布，方差贡献率为 5.24%，是通过 North 显著性检验的最后一个模态。全区旱涝灾害空间在此模态下的分布自西向东呈现“ +，-，+ ”的极型分布特征。一条“零”线自北向南绵延于陕西与晋、豫两省交界，另一条在山东省境内，自武定府—泰安府—济宁府一线分布。同时也关注到，该分布型仅在西部正值区存在分别以汉中府和兴安府为中心分布的两个大值区，荷载高值在 0.50 以上。而中部负值区和东部正值区的荷载值的绝对值普遍在 0.10 以内。说明在该模态下虽然表现出相同时段内以两条“零”线为界的中部与东、西部之间的灾害类型呈相反态势，但是一旦发生某种灾害，西部地区的灾害程度会重于东、中部。该模态下灾害空间分布型主要还是在季风作用下受到地形阻挡因素的影响，与第二模态极为类似，有所不同的是中部地区特征向量符号与东、西部地区相反，这是因为该模态下存在着更小尺度上的地形阻

挡因素而导致的[41]。

以上各模态中,*PCA* 分量的正(负)值年与正(负)载荷区的特征值乘积对应的是干旱灾害的发生,乘积结果越大代表干旱发展越严重,反之干旱发生则越轻或趋于正常;*PCA* 的正(负)值年与负(正)载荷区的特征值乘积对应的是洪涝灾害的发生,乘积结果的绝对值越大代表洪涝越严重,反之洪涝发生则越轻或趋于正常[42]。

2.2　REOF 分析

考虑到研究时段长达 442 a,黄河中下游地区旱涝灾害的变化在此时段内的时空特征变化规律较为复杂,EOF 分解所得各模态的方差贡献率普遍较低,收敛速度相对缓慢,分解得到的灾害分布异常子区域分布特征复杂多变。因此在对旱涝等级序列进行 EOF 分解的基础上进行 REOF 分解,以便更加明了的探究其区域性分布特征,划分旱涝灾害发生的气候分区。

首先需要确定旋转经验正交函数的个数 *p*:通过经验正交函数各模态的累计方差贡献率确定。一般去累计方差贡献率超过一定程度(通常为 85%)为标准确定 *p* 的个数。累计方差贡献率的具体取值以具体问题可适当增减。由于 EOF 分解的第 10 模态之后的各模态方差贡献率已不足 1%,而前 10 个模态的累计方差贡献率达 83.69%。因此旋转经验正交函数的个数 *p* 确定为 10,取前 10 个模态的特征向量进行旋转,旋转后所得的各个特征向量方差贡献率分布均匀,各特征向量的方差贡献率和对应的累计方差贡献率已在表 3 中给出。根据对旋转主

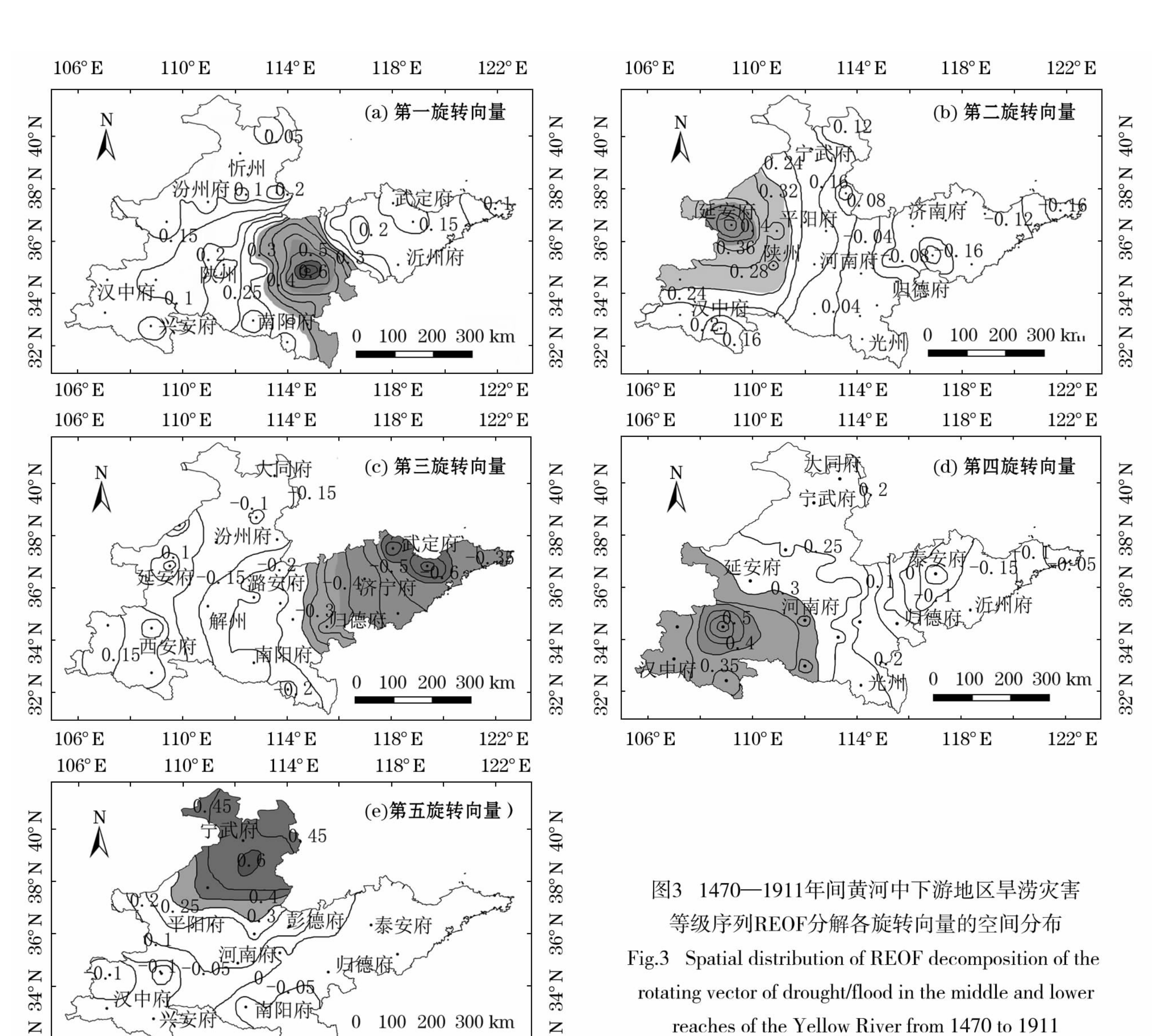


图3　1470—1911年间黄河中下游地区旱涝灾害等级序列REOF分解各旋转向量的空间分布

Fig.3　Spatial distribution of REOF decomposition of the rotating vector of drought/flood in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911

因子的分析原理[43],主因子高载荷集中的分布区域是进行气候分区的主要依据。图3给出了主因子载荷分布较为集中(累计方差贡献率73.21%)的前5个主因子的地理分布。

如图3,根据前5个旋转向量空间模态的高载荷空间分布(旋转特征值绝对值>0.3的图中阴影部分),将黄河中下游地区划分为5个气候分区,高载荷区域涵盖了黄河中下游地区的绝大多数地区,个别相邻分区之间在低值区域有少量重叠,未影响到分区效果。结合表3可知,第一旋转向量 *RLV*1 的方差贡献率为39.63%,最高载荷值为0.62,高载荷区域位于区域中部地区和南部局地的除南阳府、汝宁府、光州之外的河南省大部地区及晋东南的潞安府、泽州府和鲁西的曹州府、归德府等地,本文称之为黄河中下游地区中南部型(图3a)。第二旋转向量 *RLV*2 的方差贡献率为14.19%,最高载荷值为0.54,载荷中心为延安府。高载荷值集中分布在区域西部的陕北地区及晋西南的汾州府、平阳府等地,本文称之为黄河中下游地区西部型(图3b)。第三旋转向量 *RLV*3 的方差贡献率为9.12%,此模态下显著旋转向量特征值为负,荷载值绝对值最大为0.69,以山东省青州府为荷载中心。高载荷值集中涵盖了区域东部的山东全省和鲁豫交界处的河南省局部地区,本文称之为黄河中下游地区东部型(图3c)。第四旋转向量 *RLV*4 的方差贡献率为5.62%,荷载值中心西安府的荷载值为0.59,荷载值大值区包含了区域西南部的陕西南部地区和河南省的南阳府、河南府等地,本文称之为黄河中下游地区西南部型(图3d)。第五旋转向量 *RLV*5 的方差贡献率为4.65%,荷载值中心为山西省的太原府和忻州,二者荷载值均大于0.60,荷载值大值区主要为区域北部除平阳府、潞安府、泽州府之外的山西省全境,本文称之为黄河中下游地区北部型(图3e)。同时从第二、四、五旋转向量的空间分布图中还能看出,在高载荷正值集中体现的同时,还有部分地区的旋转向量特征值表现为负,但是绝对值均较小,未表征出明显特征。根据前项工作,作者以各旋转特征向量荷载值集中区为依据,将黄河中下游地区旱涝灾害发生依次划分为黄河中下游地区中南部地区、西部地区、东部地区、西南部地区、北部地区5个气候敏感分区(图4)。

董航宇[44]利用中国黄淮地区455个测站点的逐日降水量,利用REOF分析黄淮地区1961年以来

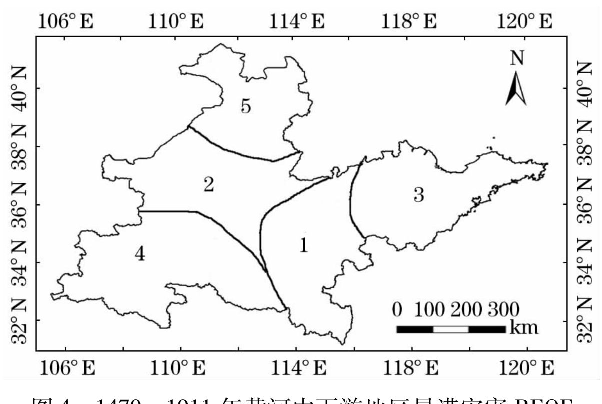


图4 1470—1911年黄河中下游地区旱涝灾害REOF分解敏感区划分

Fig. 4 Sensitive areas based on REOF of drought/flood in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911

夏季降水的空间分布特征,将包含本文研究区的黄淮地区分为9个降水敏感区,分别是华北中北部、河套地区、河北中部、黄河西北岸、山东半岛、淮河上游流域、淮河中下游流域、长江上游流域和长江中下游流域。与之对照可知,本次研究分析所得的第1~5分区分别对应其中的黄河中下游流域、黄河西北岸、山东半岛、淮河上游流域和华北中北部5个分区中的全部或部分区域,由此说明依据本文得到的REOF分解结果划分旱涝敏感区域是可行的,在今后分析该区旱涝时须重点考察上述5个区域的旱涝特征和预测。

3 结 语

通过对黄河中下游地区的河南、山西、陕西、山东四省份1470—1911年间的旱涝灾害记录,以及其空间分布变化情况的研究,可以有效发现其大量隐藏的演变规律,进而推断未来灾害的趋势,提高对黄河中下游地区未来气候预测的准确性和做好该区防灾减灾的预备工作。

本文基于1470—1911年黄河中下游地区利用经验正交函数分解的结果,探究了黄河中下游地区在442 a中旱涝灾害等级的空间分布特征,并依据REOF分解的结果划分了黄河中下游地区旱涝灾害气候敏感分区。EOF分解的结果表明,黄河中下游地区旱涝灾害的前十个空间模态累计方差贡献率为83.69%,其中前4个载荷向量通过North检验。第一模态的特征向量呈同一符号的正值分布,表现为全区一致型;第二模态呈现“东正西负”型的反向分布的东西相反型;第三模态则为西南部(正值)与东

北部(负值)反向的西南—东北反向分布型;第四模态自西向东为"+,-,+"的极型分布特征。四种不同模态分别表征了黄河中下游地区旱涝演变在全区及各个子区域间的不同空间分布特征。REOF 分解的结果主要给出了黄河中下游地区旱涝灾害变化所存在的 5 个敏感变化区域,将黄河中下游地区旱涝灾害发生依次划分为黄河中下游地区中南部地区、西部地区、东部地区、西南部地区、北部地区 5 个气候敏感分区。

本文研究分析历史时期旱涝空间特征仍存在不足:对一些站点缺测年份的进一步考证仍存在不确定性,这是下一步工作应该改进的方面,且还需研究分析旱涝变化周期以及空间分异的原因。

参考文献(References)

[1] 张强,韩永翔,宋连春. 全球气候变化及其影响因素研究进展综述[J]. 地球科学进展,2005,20(9):990 - 998. [ZHANG Qiang, HAN Yongxiang, SONG Liancun. The summarize of development of globalclimate change and its effect factors[J]. Advance In Earth Sciences,2005,20(9):990 - 998.]

[2] 任国玉,封国林,严中伟,等. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究,2010,15(4):337 - 353. [REN Guoyu, FENG Guolin, YAN Zhongwei, et al. Progresses in observation studies of climate extremesand changes in mainland China[J]. Climatic and Environmental Research,2010,15(4):337 - 353.]

[3] KNOX J C. Large increase in flood magnitude in response to modest change in climate[J]. Nature,1991,361(6411):410 - 437.

[4] JOSE I B. Major flood disasters in Europe:1950—2005[J]. Natural Hazards,2007,42(1):125 - 148.

[5] 张德二. 中国历史文献中的高分辨古气候记录[J]. 第四纪研究,1995,(1):75 - 81. [ZHANG De'er. High resolution records available from Chinese historical documents[J]. Quaternary Sciences,1995,(1):75 - 81.]

[6] 郑景云,张丕远,葛全胜,等. 过去 2000 a 中国东部干湿分异的百年际变化[J]. 自然科学进展,2001,11(1):65 - 70. [ZHENG Jingyun, ZHANG Peiyuan, Ge Quansheng, et al. Hundreds of interannual variability of dry wet differentiation in east China of over the past 2000 years[J]. Progress in Natural Science, 2001,11(1):65 - 70.]

[7] 郑景云,张丕远,周玉孚,等. 利用旱涝县次建立历史时期旱涝指数序列的试验[J]. 地理研究,1993,(3):1 - 9. [ZHENG Jingyun, ZHANG Piyuan, ZHOU Yufu, et al. A new approach of reconstructing the dryness/wetness/wetness index eries in china during historical times by using the number of drought/flood counties[J]. Geographical Research,1993,(3):1 - 9.]

[8] 周后福. 安徽省近 554 年旱涝演化规律和跃变现象[J]. 气象,2004,30(7):18 - 22. [ZHOU Houfu. On climate regularity and catastrophe phenomenon of drought and flood of Anhui Province for resent 554 years[J]. Meteorological Monthly,2004,30(7):18 - 22.]

[9] 贾铁飞,施汶妤,郑辛酉,等. 近 600 年来巢湖流域旱涝灾害研究[J]. 地理科学,2012,32(1):66 - 73. [JIA Tiefei, SHI Wenyu, ZHENG Xinyou, et al. The flood and drought disasters of the chao hu lake basin in the past 600 years[J]. Sciential Geographical Sinica,2012,32(1):66 - 73.]

[10] 张强,姜彤,刘春玲,等. 海安地区近 1000 年来的气候变化与洪灾[J]. 自然灾害学报,2004,13(3):127 - 132. [ZHANG Qiang, JIANG Tong, LIU Chunling, et al. Climatic changes and flood events since 1 000 aBP in the Hai'an region[J]. Journal Natural Disaters,2004,13(3):127 - 132.]

[11] 殷淑燕,王海燕,王德丽,等. 陕南汉江上游历史洪水灾害与气候变化[J]. 干旱区研究,2010,27(4):522 - 528. [YIN Shuyan, WANG Haiyan, WANG Deli, et al. Study on historical flood disasters and climate change in the upper reaches of the Hanjiang river[J]. Arid Zone Research,2010,27(4):522 - 528.]

[12] 仇立慧,殷淑燕,黄春长,等. 清代汉江上游洪涝灾害及其影响研究[J]. 干旱区研究,2010,26(10):57 - 61. [QIU Lihui, YIN Shuyan, HUANG Chunchang, et al. Flood disaster and its social impacts in the upper reaches of river Hanjiang in Qing Dynasty[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2010,26(10):57 - 61.]

[13] 孟婵,殷淑燕. 清末以来陕西省汉江上游暴雨洪水灾害研究[J]. 干旱区研究,2010,26(5):46 - 51. [MENG Chan, YIN Shuyanl. The rain-storm flood disasters in the upper reaches of the Hanjiang River in Shaanxi province since the late Qing Dynasty[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2010,26(5):46 - 51.]

[14] 潘威,庄宏忠,李卓仑. 1766 - 1911 年黄河上中游 5 - 10 月降雨量重建[J]. 地球环境学报, 2011,2(1):285 - 290. [PAN Wei, ZHUANG Hongzhong, LI Zhuolun. Reconstruction of the precipitation(may-oct) in the upper and middle reachers of the Yellow River(1766—1911)[J]. Journal of Earth Environment,2011,2(1):285 - 290.]

[15] 张健,满志敏,宋进喜. 1765—2010 年黄河中游 5 ~ 10 月面降雨序列重建与特征分析[J]. 地理学报,2015,70(7):1101 - 1113. [ZHANG Jian, MAN Zhimin, SONG Jinxi. Sequence reconstruction and characteristics diagnosis of areal precipitation in the middle Yellow River from May to October during 1765—2010[J]. Acta Geographica Sinica,2015,70(7):1101 - 1113.]

[16] 张健,满志敏,张俊辉. 1819 年黄河中游极端降水:史实、特征及气候背景[J]. 古地理学报,2011,13(6):687 - 698. [ZHANG Jian, MAN Zhimin, ZHANG Junhui. Extreme precipitation in the Middle Reaches of Yellow River in 1819: Historical facts, characteristics and climate background[J]. Journal of Palaeogeography, 2011,13(6):687 - 698.]

[17] 黄嘉佑,符长锋. 黄河中下游地区夏季逐候降水量的低频振荡特征[J]. 大气科学,1993,(3):379 - 383. [HUANG Jiayou, FU Changfang. The representations of the low-frequency fluctuation for the pentad precipitation in Summer in the middle-lower reaches of the Yellow River valley[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sci-

ences,1993,(3):379 - 383.]

[18] 何素兰,黄荣辉.黄河中下游旱涝年的低频波振荡特征[J].应用气象学报,1993,(4):402 - 407.[HE Sulan,HUANG Ronghui. The low frequency oscillation characteristics of typical drought/flood in the low and mi ddle reaches of Huanghe River[J]. Quartely Journal of Applied Meteorology, 1993,(4):402 - 407.]

[19] 郑景云,郝志新,葛全胜.黄河中下游地区过去300年降水变化[J].中国科学:地球科学,2005,35(8):765 - 774.[ZHENG Jingyun,HAO Zhixin,GE Quansheng. Precipitation changes in the middle and lower Yellow River over the past 300 years[J]. Science Sinica(Terrae) in,2005,35(8):765 - 774.]

[20] 郝志新,郑景云,葛全胜.黄河中下游地区降水变化的周期分析[J].地理学报,2007,62(5):537 - 544.[HAO Zhixin,ZHENG Jingyun,GE Quansheng. Precipitation cycles in the middle and lower Yellow River[J]. Journal of Geographical Sciences,2007,62(5):537 - 544.]

[21] 李周,郑世林,高媛媛.黄河中下游夏季降水时空分布及演变特征[J].气象与环境科学,2008,31(21):104 - 107.[LI Zhou, ZHENG Shili,GAO Yuanyuan. Space-time distribution and evolvement characteristics of summer precipitation in middle and lower reaches of Yellow River[J]. Meteorolo gical and Environmental Sciences,2008,31(21):104 - 107.]

[22] 王文,李伟,李耀辉.黄河中下游地区夏季旱涝年低频振荡特征分析[J].冰川冻土,2013,35(4):1007 - 1014.[WANG Wen,LI Wei,LI Yaohui. Anaysis of the LFO characteristics during summer drought/flood years over the middle and lower reaches of the Yellow River[J]. Journal of Glaciology and Geocryology,2013,35(4):1007 - 1014.]

[23] 荣艳淑,屠其璞.华北地区500年滑动平均降水场序列重建[J].气象科技,2004,32(3):163 - 167.[Rong Yanshu,Tu Qipu. Reconstruction of 500-year moving-average precipitation field series in north China[J]. Meteorological Science and Technology,2004,32(3):163 - 167.]

[24] 张德二.中国三千年气象记录总集[M].南京:凤凰出版社,2013.[ZHANG De'er. Collection of China meteorological records in three thousand [M]. Nanjing: Phoenix Publishing House,2013.]

[25] 邢昱.黄河流域近2000年来旱涝灾害水文气候数据集[DB/OL].郑州:河南大学,2006.[YING Yi. Drought and flood disasters in recent 2000 years in the Yellow River hydrology and climate data sets[DB/OL]. Zhengzhou: Henan University,2006.]

[26] 中央气象科学研究院.中国近五百年旱涝分布图集[M].北京:地图出版社,1981.[Chinese Academy of Meteorological Sciences. China's nearly five hundred years of drought and flood distribution atlas[M]. Beijng: China CartographicPublishing Hause,1981.]

[27] 中国历史地图集编辑组.中国历史地图集[M].上海:中华地图学社出版社,1974.[Atlas of Chinese History Editorial Team. The historical atlas of China[M]. Shanghai: Chinese Map Publishing House,1974.]

[28] 李禧亮,毕胜杰,魏军,等.清代石家庄地区旱涝灾害变化规律研究[J].干旱区资源与环境,2014,28(9):161 - 165.[LI Xiliang,BI Shengjie,Wei Jun,et al. Change laws of drought and flood disasters in Shijiazhuang region in Qing dynasty[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment,2014,28(9):161 - 165.]

[29] 吴洪宝.气候变率诊断和预测方法[M].北京:气象出版社,2005.[WU Hongbao. Climate change rate of diagnosis and prediction method[M]. Beijing:China Meteorological Press,2005.]

[30] LIN Z,SU Q,LU R. Revisiting the second EOF mode of interannual variation in summer rainfall over East China[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2016,33(1):121 - 134.

[31] ZHOU W,CHEN M, ZHUANG W,et al. Evaluation of the tropical variability from the Beijing Climate Center's real-time operational Global Ocean Data Assimilation System[J]. Advances in Atmospheric Sciences,2016,33(2):208 - 220.

[32] 徐利岗,周宏飞,杜历,等.1951—2008年中国西北干旱区降水时空变化及其趋势[J].中国沙漠,2015,35(3):724 - 734.[XU Ligang,Zhou Hongfei,Du Li,et al. Spatio-temporal change and trend of Precipitationin northwest China during1951—2008[J]. Journal of Desert Research,2015,35(3):724 - 734.]

[33] 牛涛,陈隆勋,王文,等.青藏高原冬季平均温度、湿度气候特征的REOF分析[J].应用气象学报,2002,13(5):560 - 570.[Niu Tao,CHENG Longxun,WANG Wen,et al. The Qinghai-Tibet Plateau winter average temperature, humidity REOF analysis of climatic characteristics[J]. Quartely Journal of Applied Meteorology,2002,13(5):560 - 570.]

[34] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M].北京:气象出版社,1999:269.[WEI Fengying. Modern climatic statistical diagnosis and prediction technology[M]. Beijing: China Meteorological Press,1999:269.]

[35] 杨成芳.山东省人体舒适度的REOF分析[J].气象科学,2006,26(1):103 - 109.[YANG Chengfang. Analysis of reof on body comfort in shandong[J]. Scientia Meteorologica Sinica,2006,26(1):103 - 109.]

[36] 吴珊珊,黄彩婷.基于REOF方法的江西省6月降水趋势分区预测[J].气象与减灾研究,2015,(1):8 - 15.[WU Shanshan,HUANG Caiting. Prediction of partition precipitation trends of Jiangxi in june based on REOF[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,2015,(1):8 - 15.]

[37] 韩荣青,高辉,李维京,等.旋转经验正交函数分解回归方法在东北夏季气温季节预测和成因诊断中的应用[J].气象学报,2014(2):291 - 305.[HAN Rongqing,GAO Hui,LI Weijing,et al. Stepwise regression to seasonal forecast and cause diagnosis for summer temperature anomaly in northeast China[J]. Acta Meteorologica Sinina,2014(2):291 - 305.]

[38] 张平.基于REOF的青藏高原东侧降水区划分析[J].四川气象,2007,27(3):1 - 2.[ZHANG Ping. Based on the analysis of REOF the east of the Qinghai-Tibet Plateau rainfall zoning[J]. Journal of Sichuan Meteorology,2007,27(3):1 - 2.]

[39] 刘晓云,李栋梁,王劲松,等.1961—2009年中国区域干旱状况的时空变化特征[J].中国沙漠,2012,32(2):473 - 483.[LIU Xiaoyun,LI Dongliang,WANG Jinsong,et al. Spatiotemporal characteristics of dought over China during 1961—2009[J]. Journal of

Desert Research,2012,32(2):473－483.]

[40] NORTH G R,BELL T L,CAHALAN R F,et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Monthly Weather Review,1982,110(7): 699－706.

[41] 闫冠华. 太行山脉对华北暴雨影响的研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.[YAN Guanhua. Study on the impact of Taihang Mountains on torrential rains in north China[D]. Nanjing: Nanjing University of Information and Science Technology,2013.]

[42] 李艳萍. 明清时期华北地区干旱灾害特征分析[D]. 南京:南京信息工程大学,2015.[LI Yanping. The characteristics of dought disasteris in north China during the Ming and Qing Dynasty [D]. Nanjing:Nanjing University of Information and Science Technology,2015.]

[43] 白爱娟,施能,方建刚,等. 陕西省降水量变化的区域特征分析[J]. 高原气象, 2005,24(4):635－641.[BAI Aijuan, SHI Neng, FANG Jiangang, et al. Analyses on regional characters of rainfall change in Shaanxi Province [J]. Plateaum Eteorology, 2005,24(4):635－641.]

[44] 董航宇,赵琳娜,刘莹. 中国黄淮地区夏季降水的时空分布特征分析[C]//水文气象、地质灾害气象预报与服务,2012.[DONG Hangyu,ZHAO Linna,LIU Ying. China's huanghuai region spatial and temporal distribution of summer precipitation in the analysis[C]//The hydrometeorological, geological hazard meteorological forecast and service,2012.]

Spatial characteristics of drought/flood disasters based on EOF and REOF in the middle and lower reaches of the Yellow River from 1470 to 1911

ZHAO Feng,　BI Shuo-ben,　LI Xing-yu,　WU Wei-ting,　JIANG Ting-ting

(*School of Geography Science*, *Nanjing University of Information Science & Technology*, *Nanjing* 210044, *Jiangsu*, *China*)

Abstract: Based on the collected and sorted records of the drought and flood in the middle and lower reaches of the Yellow River region, China from 1470 to 1911, the paper reconstructed the sequence of drought and flood of 36 stations and the history map of the study area, and analyzed the spatial characteristics using EOF and REOF. The results from the EOF analysis showed that the cumulative variance contribution rate of the first 4 models is 71.85%. The main characteristics indicated that the first, the second and the fourth models displayed a longitude distribution, while the third model was shown a latitude distribution. The spatial distribution of the first eigenvector field were all positive, which indicated that there was consistency for the changes of drought and flood in the middle and lower reaches of the Yellow River region. But there were obvious difference among the rest of the eigenvector fields, which illustrated the drought and flood change also had the local features under the different background conditions and field effects. Based on the results from the REOF analysis, there can be divided into five typical sensitive climate partitions in the middle and lower reaches of the Yellow River region. The analysis laid the foundation for the further study about drought/flood regional characteristics.

Key words: EOF; REOF; drought and flood; spatial characteristics; middle and lower reaches of the Yellow River